

文章编号: 1005—0523(2006)02—0037—03

# 交通流量比率控制指数应用分析

肖 鹏, 白存儒, 李思海, 褚芳芳

(西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:**介绍了一种评价实际到达的交通流与预期的交通流的比率的单值指标. 基于事后分析, 综合考虑了因航班调配而引起的费用问题, 并结合具体实例, 给出了求解该指标的计算方法. 同时指给出了该参数的意义以及如何在分析 GDP 时的应用.

**关 键 词:**空中交通管理; 交通流量管理; 比率控制指数; 航班分布

**中图分类号:** U11

**文献标识码:** A

## 1 引言

空中交通流量管理的目的是通过对交通流量的调整来保持安全而高效地利用的空域和机场<sup>[1]</sup>. 通常采用调整经过空域扇区或机场的交通流量的方法, 来确保空域单元不至于负荷过重, 以维持现有的吞吐量. 在空域使用过程中, 由于存在许多短期的不合理的容量需求, 经常需要采取一些战略措施比如改航或者限制飞行间隔而使之得到缓解. 同时初始的交通流量是以需求和资源容量的预测为基础的, 因而这些预测值极大地依赖于一些随机条件, 比如恶劣天气, 机场施工, 或者特殊的跑道业务营运的影响, 经常导致初始的交通流量达不到预期的要求. 而在航班容许进场率减小的情况下, 通常将采取地面等待策略<sup>[2,3]</sup>来代替昂贵的、危险的空中等待, 也就是采取主动的降低机场到达率的措施以适应航站调度员所能安全地处理的水平.

正是由于采取了这些交通流量管理措施, 导致实际的机场容许接受率与预测的机场接收率不一致而产生一定偏差. 对这种偏差如何描述, 或者说采用怎样一种指标来描述实际到场分布与预期的到场分布的接近程度, 是本文主要解决的问题. 同时也希望对于这一指标的分析中, 能够挖掘基于流量控制措施的一些因素, 对一些流量控制措施的执行效果进行简单的分析说明.

首先需要强调的是, 对空中交通管制措施进行直接评估的方法并不总是判断新的或者初始程序的最好方法. 不

完善或者不良的指标参数的选择, 很容易受到基于计划措施的预测的质量的影响. 为了便于对所执行的地面等待程序 (GDP) 的效果进行对比分析, 引入了因航班的延误或者提前到场而导致的运营费用问题的分析, 综合多种因素, 基于事后分析而提出交通流量控制指数 (RCI) 这一概念. 希望通过利用这一综合性指数, 对实际到场的交通流与期望的交通流而不是机场接收率进行比较, 来估计实际交通流量分布与计划交通流量分布的接近程度.

## 2 问题分析

假设  $P = (p_0, p_1, \dots, p_T)$  和  $R = (r_0, r_1, \dots, r_T)$  分别表示预定时段航班到场分布序列和实际的航班到场分布序列. 其中  $p_t$  和  $r_t$  分别表示时间段  $t$  的预定到场航班和实际到场航班. 直接比较预定的航班数与实际的航班数的方法是将序列中相应的数值相减, 如公式 (1) 所示,

$$E = P - R = [p_0 - r_0, p_1 - r_1, \dots, p_T - r_T] \quad (1)$$

通过这种向量相减的方法, 分析单位时间 (比如每小时) 的航班的平均偏差. 例如, 以 60 分钟为时段的航班预计到场分布为  $P = (30, 30, 30, 30, 30)$ , 实际的到场分布为  $R = (30, 30, 30, 31, 29)$ , 这种情况下, 通过计算平均航班偏差显然不是一个很好的方法. 由于第 4 小时中多出一架航班, 抵消了第 5 小时缺少的一架航班而使平均为零. 比较可行的方法是计算绝对偏差的, 如公式 (2) 所示,

**收稿日期:** 2006—01—09

**作者简介:** 肖鹏 (1977—), 男, 2003 级硕士研究生, 研究方向为空中交通流量管理.

$$\text{Avg} \cdot \text{Abs} \cdot \text{Error} = \frac{|0| + |0| + |0| + |-1| + |1|}{5} = \frac{2}{5} = 0.4$$

4 (2)

虽然公式(2)分别正确地记录了第4个小时多到达一架航班,而第5个小时少到达一架航班的这种情况,但是这种方法并没有描述出导致实际到场分布为  $R$  的根本因素.特别是在第4小时中有31架航班到场,第5小时中有29架航班到场的情况下,肯定需要有一架航班从第4小时调配到第5小时.

另一种评估这种偏差的方法是记录所有的导致实际到场分布  $R$  与预计到场分布  $P$  偏差的航班数量,这种方法相当于采用最小数量的航班调配以使分布  $R$  转化分布  $P$ .这可以看作是另一种衡量两个分布的偏差的方法.

这种方法可以更好地区分不同的实际到场的航班数量分布序列,并可以对其有效地进行比较.如对于  $R_2 = (31, 30, 30, 30, 29)$ , 在第1小时中预期到场30架航班,而实际到场31架,其中多余的一架航班应该在第2小时到场,而实际提前在第1小时到场.第2小时到达的是30架航班而不是  $30-1=29$  架航班,因此,其中一架预期第3小时到场的航班,应该在第2小时到场.同样地,一架预期第4小时到场的航班,却提前在第3小时到场,预期第5小时到场的航班确在第4小时到场.如果按公式(2)那样计算平均绝对误差,  $R_1$  和  $R_2$  与  $P$  相比而言,有相同的交通流比率(0.4架/小时),与之相比,综合的航班调配方法可以识别出  $R_2$  中航班调配数是  $R_1$  中的四倍.同时,要对  $R_2$  和  $R_1$  两种航班到场分布进行比较,还应进一步考虑不同航班的调配所带来的费用问题,因为从经济指标角度来综合考虑,也是评价所采取的交通流量控制措施所产生效果的重要因素.

### 3 航班调配费用计算

假定  $D$  与  $D'$  是两个需要用  $RCI$  指数进行比较的  $(T+1)$  维航班分布向量,定义  $T$  维向量  $F = (f_1, f_2, \dots, f_T)$ , 其中  $f_i$  表示需要从  $d_{i-1}$  调配到  $d_i$  的航班数量.  $d_i$  接收到从  $d_{i-1}$  调配  $f_i$  的架航班,  $d_{i+1}$  接收到从  $d_i$  调配的  $f_{i+1}$  架航班.时间段  $t$  净增的航班  $\Delta_t = d_t - d'_t$ , 如图1所示,



图1 分布  $W$  的最大费用分析

为了将  $d_i$  转化为  $d'_i$  需要满足公式(3)所述的条件,

$$d_i + f_i - f_{i+1} = d'_i \quad (3)$$

其中,  $f_i$  可以是正数或者负数,对于给定的  $D$  与  $D'$ ,  $F$  可以通过给定的初始值  $f_1$  计算,如公式(4)所示,

$$f_1 = d_0 - d'_0 \quad (4)$$

应用公式(5)表示的递归关系可以求解  $f_i$ ,

$$f_i = d_{i-1} - d'_{i-1} + f_{i-1} \quad (5)$$

对于  $t=2, 3, \dots, T$  向量  $F$  的元素可用公式(6)求解

$$f_t = \sum_s (d_{s-1} - d'_{s-1}), t=1, 2, \dots, T. \quad (6)$$

如果分布  $D$  与  $D'$  的元素之和不相等,那么在计算向量  $F$  之前,通过分别向每个分布添加第  $(T+2)$  个元素,使之元素之和相等.向量之和较大的那个分布添加一个数值为0的元素,之和较小的那个分布添加一个数值非负的元素.

$\sum_{i=1}^T |f_i|$  可以看作是将分布  $D$  转换为  $D'$  所需工作量.如果给  $f_i$  乘以各自的费用正负参数  $c^+$  和  $c^-$ , 调配  $f_i$  架航班的费用采用公式(7)表示,

$$\text{cost}(f_i) = c^+ \max\{f_i, 0\} + c^- \max\{-f_i, 0\} \quad (7)$$

总费用可以通过公式(8)计算,

$$C(D, D') = \sum_{i=1}^T \text{cost}(f_i) \quad (8)$$

对于给定的分布  $D$  与  $D'$ ,  $F$  是唯一确定的,由公式(8)可知,如果  $C(D, D')$  的值为  $ac^+ + bc^-$ , 那么  $C(D', D)$  的值为  $bc^+ + ac^-$ , 这就意味着无论  $c^+ \neq c^-$ , 航班到场分布由  $D$  转换为  $D'$  和由  $D'$  转换为  $D$  的费用可能是不同的.

## 4 实例分析

### 4.1 假设条件

假定执行了以4小时为单位的地面等待程序,并且预计到场接收率为30架/小时,即预期的到场分布是  $P = (30, 30, 30, 30)$ , 并假设实际到场的分布为  $R = (27, 32, 35, 24)$ , 那么  $R$  相对  $P$  的比率控制指数定义为  $RCI(P, R)$ .

### 4.2 实例解析

这是将分布  $R$  转化为  $P$  的航班最小调配问题.如图2所示,分布  $R$  从左到右随时间  $t$  增加依次排列,从  $r_t$  移动  $f_{i+1}$  架航班到  $r_{i+1}$  得到  $r'_i = r_i - f_{i+1} = p_i$ . 并且规定,左移为负,右移为正,从第1小时调配到第0小时的航班为  $f_1 = -3$ , 从第2小时调配到第1小时的航班为  $f_2 = -1$ , 从第2小时调配到第3小时为  $f_3 = 4$ .

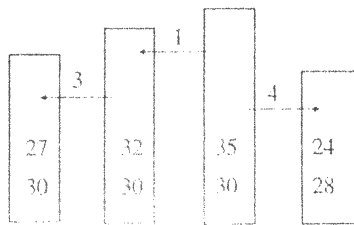


图2 航班到场分布调配图

至此,分布  $R$  已经转换为  $R' = (30, 30, 30, 28)$ , 相对期望的航班安排而言,缺少  $\sum p_i - \sum r'_i = 120 - 118 = 2$  架.为了弥补缺少的这两架航班,按上述方法将  $R'$  进一步扩充为  $R'' = (27, 32, 35, 24, 2)$ , 同样也将  $P$  扩充为  $P' = (30, 30, 30, 30, 0)$ . 根据图示的航班调配方法,需要将扩展后的航班到场分布的第3小时的航班调配到第4小时,即  $f_4 = -2$ . 航班调配情况如表1所示,

表 1 各时段的航班调配数

| 航班调配方向                  | 调配航班数 | 航班一小时 |
|-------------------------|-------|-------|
| $Hr^0 \rightarrow Hr^1$ | $f_1$ | -3    |
| $Hr^1 \rightarrow Hr^2$ | $f_2$ | -1    |
| $Hr^2 \rightarrow Hr^3$ | $f_3$ | 4     |
| $Hr^3 \rightarrow Hr^4$ | $f_4$ | -2    |

计算将航班到场的分布序列  $R$  转换为预计的部分序列  $P$  的费用. 设  $c^-$  表示单架航班延误单位时间的费用,  $c^+$  表示单架航班提前到场单位时间的费用. 将航班划分为延误航班和早点航班, 并分别记为  $M^- = |-3| + |-1| + |-2|$ ,  $M^+ = 4$ , 总费用可以表示为,

$$c^- M^- + c^+ M^+ = 6c^- + 4c^+ \tag{9}$$

假设  $c^- = c^+ = 1.0$ , 代入公式(9)计算得到总费用为 10.

为了比较不同时间长度和数量航班的地面等待程序, 可以通过除以最大费用将分布误差规范化. 这就意味着必须找到一种航班总量为 120 架的分布, 使得  $(P' - W)$  的费用最大, 选取所有的航班都降落在最后一个小时( $W$  的选取方法请参考文献[4]), 即  $W = (0, 0, 0, 0, 120)$  使得费用为

$$P' - W = (|4| + |-3| + |-2| + |-1|) \times 30 = 300 \text{ 架} - \text{小时} \tag{10}$$

因此, 分布  $R$  的交通流量比率控制指数可以通过下面的公式(11)计算,

$$\frac{10 \text{ 架} \cdot \text{小时}}{300 \text{ 架} \cdot \text{小时}} = 0.033 \tag{11}$$

由于确保费用指数为 1, 这个单纯的比率仅仅表明实际的分布的误差. 为了使该指数具有更好的适用性, 将该参数更改为实际的分布所能达到比率而不是未能达到的比率, 用 1 减去上述数值, 即得到交通流量比率控制指数  $RCI$ ,

$$RCI(P', R) = 1.0 - 0.033 = 0.966 \tag{12}$$

这一指数可以转化为百分比 96.67%, 该值可以解释为实际的交通量到场分布达到预计的到场分布的百分数为 96.67%.

5 小结

本文介绍了一种比较机场或者空域扇区中实际的航班到场分布与预计的航班到场分布的方法. 对因航班的调配而引起费用问题进行了综合考虑与分析, 由于在分析过程中, 采用了一种比较通用的形式, 比较了两个有限元素的分布, 因而这一方法也可以用在车辆交通流量管理方面. 对于交通流量比率控制指数在评价交通流量控制措施, 比如地面等待程序的执行效果分析的应用方面, 还需要作进一步的扩展与深入研究.

参考文献:

[1] 刘慧英, 周 勇. 空中交通管理系统导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

[2] O. Richetta and A. R. Odoni, "Solving optimally the static ground-holding policy problem in air traffic control," *Transportation Sci.*, vol. 27, no. 3, pp. 228-238, Aug. 1993.

[3] M.Terrab and A. R. Odoni, "Strategic flow management for air traffic control," *Oper. Res.*, vol. VOL. 41, pp. 138-152, Jan./Feb. 1993.

[4] R. L. Hoffman and M. O. Ball, "The Rate Control Index for Traffic Flow" *IEEE Transactions on intelligent Transportation systems*, Vol. 2, No. 2, June 2001.

Application and Analysis for Traffic Flow Rate Control Index

XIAO Peng, BAI Cun-ru, LI Si-hai, CHU Fang-fang

(School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** The research in this paper introduced a single-valued metric for post-operatively rating the performance of achieved traffic flow against targeted traffic flow into an airport or sector of space. In analysis, concerned major aspects factors especially including the cost of flights movements, the solution about how to compute traffic flow rate control index was given by integrating concrete sample. At same time, the meaning of this metric was interpreted and how to apply traffic flow rate control index on evaluation ground delay program performance was pointed out.

**Key words:** air traffic management; air traffic flow management; rate control index; flights distribution